

Formation de structures induites par des contraintes mécaniques et géométriques : Des systèmes physiques aux systèmes biologiques.

Laurent Boué

*Université Paris XI Orsay**

Directrice de thèse : Martine Ben-Amar

Co-directeur de thèse : Arezki Boudaoud

Organisme d'accueil : Laboratoire de Physique Statistique UMR 8550

Département de physique de l'École Normale Supérieure

24 rue Lhomond 75005 Paris

I. CHOIX DE LA THÈSE

La motivation première qui m'a animé lors de la recherche de mon sujet de thèse en physique statistique était de trouver un laboratoire dont les domaines d'intérêts traduisent une grande ouverture d'esprit. Bien que je cherchais à intégrer plutôt un groupe de théoriciens, ma curiosité n'aurait pu être satisfaite que si ce groupe ne travaille en étroite collaboration avec des expérimentateurs. Ce sont exactement ces deux aspects qui m'ont naturellement guidé vers le LPS et plus particulièrement vers le groupe de "Théorie non-linéaire des instabilités" de Martine Ben Amar.

Là-bas, Mokhtar Adda-Bedia m'a proposé de travailler sur le problème de compaction de tige élastiques confinées dans des disques ou dans des boules. On peut s'inspirer, pour l'étudier, de l'exemple des virus bactériophages dans lesquels le matériel génétique est fortement compacté dans leurs capsides. Quelle est alors la forme de la tige, la pression qu'elle exerce sur la capsidite? Alors qu'une excursion dans le groupe voisin d'Yves Couder pour y monter une expérience directement liée au calculs théoriques est envisageable, la résolution de ce problème débouche sur l'étude

*Electronic address: bouel@ipno.in2p3.fr

compliquée du papier froissé.

De la même manière, Arezki Boudaoud m’a introduit à l’étude des phénomènes d’adhésion. Il s’agit ici de déterminer quelles sont les structures optimisant l’adhésion de tiges élastiques à des surfaces rugueuses. Ce thème est inspiré de l’exemple biologique des *geckos* qui adhèrent à toute surface (par l’interaction de Van der Waals) grâce à un réseau arborescent de pattes très fines.

Ce sont ces thèmes de recherche, à la fois à la frontière entre plusieurs disciplines (physique, biologie...) et à échelles humaines mais qui restent pourtant toujours si mystérieux qui m’ont poussé à choisir cette thèse.

II. PRÉSENTATION DE L’ÉQUIPE

A. Présentation du laboratoire

Je vais effectuer ma thèse de doctorat dans le groupe de “Théorie non-linéaire des instabilités” du Laboratoire de Physique Statistique (LPS). Ce laboratoire fait partie du département de Physique de l’École Normale Supérieure et est associé au CNRS ainsi qu’aux Universités Paris VI et Paris VII.

Composé d’une quarantaine de membres permanents, le LPS brosse un très large éventail des thèmes de recherche les plus récents en physique statistique. La diversité apparente des sujets traités au LPS est grande puisqu’y on étudie aussi bien les systèmes désordonnés que les réseaux de neurones, la physique de la matière condensée, de la matière molle et des différents systèmes issus du vivant ainsi que les transitions de phases, les instabilités et les phénomènes non-linéaires... Les activités sont cependant regroupées en 4 grands thèmes qui sont tous liés à l’ordre, au désordre ou à la transition entre ordre et désordre dans la matière :

- Turbulence et phénomènes non-linéaires
- Physique Statistique de la matière condensée
- Systèmes moléculaires organisés
- Physique tournée vers les systèmes vivants.

Cette interdisciplinarité très développée nécessite souvent la collaboration entre chercheurs de différents départements. Le LPS se compose à peu près de 60% d’expérimentateurs et 40% de

théoriciens. De même, de nombreuses études réalisées à l'interface avec la biologie sont menées avec le soutien de biologistes et de chimistes. On y développe aussi les cognisciences, des modèles économiques...

Plusieurs des travaux poursuivis au LPS ont des applications potentielles et certaines sont appuyées par soutien industriel (le mouillage, avec le soutien de l'Institut Français du Pétrole, l'émulsification spontanée avec le soutien de RHODIA...)

B. Présentation de l'équipe

Le groupe "Théorie non-linéaire des instabilités" est dirigé par Martine Ben-Amar et compte 6 chercheurs permanents : Arezki Boudaoud, Mokhtar Adda-Bedia, Yves Pomeau, Vincent Hakim et Marc-Étienne Brachet. En plus de Martine Ben-Amar, je serais amené à travailler en forte collaboration avec Arezki Boudaoud (co-directeur de thèse) ainsi qu'avec Mokhtar Adda-Bedia. Eytan Katzav, postdoctorant du laboratoire de physique théorique de l'ENS a déjà commencé à travailler sur le problème de compaction depuis quelques mois et sera aussi présent pour me guider. Un autre étudiant va commencer sa thèse sur l'étude de la nervuration des feuilles en même temps que moi.

Les domaines d'intérêts de ce groupe sont nombreux mais la thématique reste souvent centrée sur l'apparition de motifs complexes dans des systèmes physiques ou biologiques. Par exemple, Mokhtar Adda-Bedia est un spécialiste reconnu dans le domaine de la formation et de la croissance des fractures. Le groupe travaille également en étroite collaboration avec des chercheurs étrangers comprenant par exemple, James R. Rice et Lakshminarayanan Mahadevan (Harvard, USA) ou Alain Karma (Northeastern, USA)...

III. PRÉSENTATION DE LA THÈSE

La génération spontanée de formes dans la nature correspond à divers types de brisure de symétrie de systèmes initialement homogènes. Des processus, à première vue différents, peuvent être réduits à une structure mathématique identique et conduire à la formation de structures similaires. Une grande famille de motifs (comme ceux apparaissant lors de la digitation visqueuse ou lors de phénomènes d'agregation limitée par diffusion par exemple) est déjà largement étudiée dans

la littérature. La plupart de ces motifs sont interprétés comme résultant d'une croissance dans des champs de diffusion ou dans des systèmes Laplaciens. Une autre classe de structures fréquemment observée dans la nature résulte d'instabilités induites par des forces mécaniques. Bien que ces problèmes soient habituellement abordés sous la forme de systèmes dynamiques, la classification des motifs induits par l'action combinée de contraintes élastiques et géométriques reste peu étudiée.

Par exemple, les virus bactériophages ont la grande particularité que leur matériel génétique est fortement compacté dans l'enveloppe (ou capsid). Ainsi, le bactériophage T4 possède une molécule d'ADN de longueur $54 \mu\text{m}$ alors que la capsid a un rayon de $50 \mu\text{m}$. Des mesures ont montré que la pression effective provenant de ce confinement est énorme, de l'ordre de 50 atmosphères [1]. Dans ce système, l'aspect mécanique provient de la préférence des tiges à rester droites : toute déformation a pour effet d'introduire une tension élastique. D'autre part, la géométrie globale, i.e. la taille du système, et sa forme semblent être en conflit avec l'aspect précédent. La question intéressante est alors : Comment les tiges s'auto-organisent-elles ?

Des résultats expérimentaux récents ont été obtenus dans le cas de la compaction d'une tige élastique (1D) dans un disque (2D) [2]. Lorsque la longueur de la tige insérée dans le disque dépasse la taille caractéristique du disque, la tige se déstabilise et forme des boucles. Le confinement de la tige, lors de la compaction, à un espace de dimension 2 impose des conditions très fortes de non inter-pénétrabilité. On arrive donc assez vite à une situation dans laquelle il n'est plus possible de faire rentrer plus de tige à l'intérieur du disque. La tige, qui est maintenant constituée de cascades de boucles, est devenue une structure rigide comme on le voit sur la figure 1.

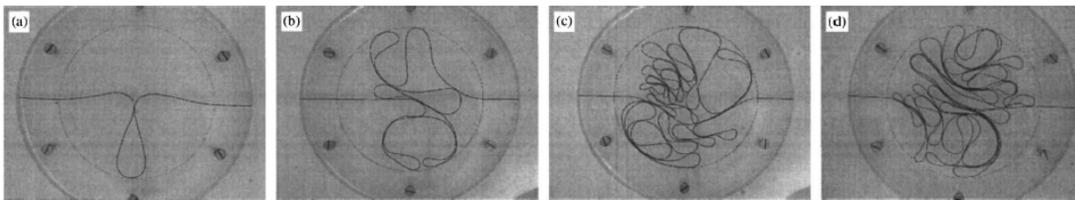


FIG. 1: *Conformations typiques d'une tige élastique compactée dans un disque (2D) (a) 42.9, (b) 150, (c) 300 et (d) 470 cm [2].*

La procédure expérimentale suivie par les auteurs de l'article impose cependant la présence d'au moins un point fixe par lequel la tige est injectée. Un des projets de la thèse est d'élaborer une expérience, en collaboration avec le groupe d'Yves Couder, qui permette d'étudier la compaction

de 1D dans 2D sans avoir de point fixe. Une des manières envisagées est de faire passer une feuille de papier à l'intérieur d'un cerceau. Les plis qui se forment alors, au niveau du contact cerceau-papier, sont bien comparables à la compaction d'un objet de dimension 1 dans un espace de dimension 2. Il est d'ailleurs intéressant de remarquer que la compaction d'une tige dans un espace de dimension 3 est plus simple à traiter que dans un espace de dimension 2. En effet, la contrainte de non inter-pénétrabilité est alors relâchée : La tige est libre de se croiser.

Notre approche consistera à étudier les formes d'équilibre d'une tige élastique confinée dans un disque (2D) ou dans une boule (3D) par minimisation de l'énergie élastique et par une étude statistique des configurations admissibles. Ceci est possible dans le cadre d'une théorie statistique des champs en utilisant des techniques d'intégrales de chemin. L'objectif est de prédire un équation d'état exacte du système. Dans un domaine qui progresse principalement par des simulations numériques et des résultats expérimentaux, cette approche beaucoup plus analytique est, en soi, une nouveauté. Elle sera aussi plus prédictive que les simulations lourdes car elle utilisera des ingrédients minimaux et les invariances d'échelle.

Le stage du mois de mai permettra de me familiariser avec ce problème de compaction. En effet, je commencerai par développer des simulations numériques dans la continuité de celles débutées par Eytan Katzav (LPT, ENS). Je pourrais aussi, en parallèle, calculer exactement l'énergie élastique associée à quelques motifs simples de boucles qui apparaissent lors de la compaction de 1D dans 2D.

La deuxième partie de la thèse est consacrée à l'étude de phénomènes d'adhésion. En effet, les lézards (tout comme les insectes) adhèrent à toutes les surfaces en grande partie grâce aux forces de Van der Waals développées par les poils (setæ) dont sont munies leur pattes [3]. L'exemple le plus frappant de ces propriétés exceptionnelles d'adhésion se trouve dans les *geckos* dont la taille peut aller jusqu'à une vingtaine de centimètres. On peut en voir une illustration sur la figure 2.

Alors que de nombreuses études montrent que les poils doivent être petits pour optimiser l'adhésion, l'influence de la forme du contact sur l'adhésion commence juste à être étudiée en détail [4]. En fait, dans le cas du *gecko*, ces poils sont organisés en structure arborescente avec des embranchements successifs se terminant par des spatules. Quelle est l'utilité d'une structure aussi complexe ? Une hypothèse raisonnable est qu'elle permet d'adhérer à des surfaces rugueuses. La suite de la thèse consisterait à tester cette hypothèse en étudiant les propriétés



FIG. 2: *La structure ramifiée de ses pattes permet, sans doute, au gecko d'adhérer aux surfaces rugueuses grâce aux interactions de Van der Waals.*

optimales d'assemblage de tiges élastiques. L'approche théorique la plus fructueuse n'est pas encore clairement définie pour le moment. Un des objectifs du stage et du début de la thèse sera donc de bien comprendre les phénomènes physiques qui entrent en jeu lors de l'adhésion. Il sera ensuite possible de développer une théorie prédictive en se basant sur ces principes de base.

L'ensemble des études analytiques et numériques qui seront menées au cours de la thèse ne se réduisent pas seulement à leurs aspects fondamentaux. En effet, on peut imaginer plusieurs applications possibles de ces calculs. Par exemple, la première partie donnerait une mesure de l'énergie absorbée lors d'un processus de compaction (accident de voiture, par exemple). La seconde partie pourrait aussi conduire à la conception de matériaux adhésifs optimaux.

IV. PERSPECTIVES PROFESSIONELLES

Le LPS accueille chaque année une vingtaine de doctorants. Les étudiants qui font leur thèse dans l'équipe "Théorie non-linéaire des instabilités" avec Martine Ben-Amar ont tous trouvé un poste permanent que ce soit comme chercheur au CNRS où comme maîtres de conférences. Cependant, la plupart de ces étudiants sont passés auparavant par un séjour post-doctoral. Grâce à ses collaborations, principalement avec des équipes dans des universités américaines, Martine Ben-Amar facilite la recherche de post-docs pour ses étudiants, notamment à l'université de Harvard. J'aimerais beaucoup faire un post-doc aux États-Unis à l'issue de ma thèse avant de chercher un poste de chercheur.

V. CONCLUSION

La rédaction de ce rapport de pré-thèse m'a permis tout d'abord de bien clarifier mes idées vis à vis du contenu scientifique et des objectifs du sujet de thèse en lui-même. En effet, Mokhtar Adda-Bedia m'a déjà donné quelques articles spécialisé que j'ai pu commencer à étudier. (Quelques-uns de ces articles sont fournis en référence de ce rapport.) Il s'agira bien de physique théorique pour expliquer l'apparition de motifs lors d'instabilités mécaniques. Cependant l'aspect expérimental sera aussi très présent puisque je serai amené à collaborer directement avec des expérimentateurs. En gardant en tête que le travail analytique sera également accompagné par la mise en œuvre de quelques simulations numériques, cette répartition des compétences, nécessaires au bon déroulement de la thèse, correspond exactement à ce que je recherchais.

Ce rapport m'a aussi offert une première expérience de l'environnement humain dans lequel je vais passer les 3 prochaines années. En plus de Martine Ben-Amar, Arezki Boudaoud et Mokhtar Adda-Bedia qui forment le cœur dur des chercheurs qui m'encadreront, j'ai commencé à rencontrer d'autres chercheurs du LPS. À leur contact, je commence à comprendre maintenant quelle est la motivation commune qui anime l'ensemble des membres du LPS : Les thèmes de recherche apparemment si différents qui y sont traités ne le sont finalement qu'en surface. En fait, ces thèmes sont, pour la plupart, subtilement interconnectés. Je suis impatient de commencer ma thèse dans cet environnement que je crois être idéal pour un bon épanouissement scientifique.

-
- [1] C. Bustmante, Z. Bryant and S. B. Smith, *Nature*, **421**, 423-427 (2003)
 - [2] C. C. Donato, M. A. F. Gomes and R. E. de Souza, *Phys. Rev. E*, **66**, 0151102 (2002)
 - [3] K. Autumn et al, *Nature*, **405**, 681-685 (2000)
 - [4] R. Spolenak, S. Gorb, H. Gao and E. Arzt, *Proceedings of the Royal Society of London A*, in the press (2004)